Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 1, 2024. (115-128)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Formability Study in Roll Forming Process: Insights into the Influence of Process Parameters on Damage Distribution *

Research Article

Hossein Talebi-Ghadikolaee[1], Hassan Moslemi Naeini[2], Vahid Zal[3], Farzad Ahmadi Khatir[4]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.84727.1207

1- Introduction

The processes of sheet metal forming consist of mechanisms designed to induce plastic deformation for the production of components with specific geometries. Various processes, such as rubber pad forming, stamping, incremental forming, hydroforming, and bending, have been employed for the production of metallic components, including bipolar plates made from steel and titanium sheets, tube forming, dome-shaped components, conical structures, and cubic shapes. Roll forming is another example of sheet metal forming procedures used to produce channel-shaped cross-sections, which is the focus of this study. Due to the inherent bending nature of deformation in roll forming and the development of tension in the outer area of the bent region, fracture becomes a limiting factor. Therefore, ensuring the production of a flawless and defect-free part requires establishing a safe range for process parameters. It is essential to employ appropriate methods for predicting failure in metal forming processes, particularly in roll forming. Valuable research has been conducted in the prediction of failure in roll-forming processes; however, a crucial aspect in the discussion of damage distribution is the generalizability of results across different forming conditions. Considering the sensitivity of model accuracy to the loading path in the process, it is imperative to investigate the impact of roll-forming process parameters on the loading path and deformation mechanics. Furthermore, after establishing the generalizability of results (evaluating changes in deformation mechanics and loading conditions), the effect of process parameters on damage distribution is examined, an aspect not addressed in previous studies. Therefore, in this research, the Mohr-Coulomb criterion was employed to predict failure in the roll-forming process. Initially, the influence of process parameters, including thickness, bending angle, and bending radius, on deformation mechanics is investigated. After ensuring the generalizability of results, the progression of damage distribution and occurrence of failure under various roll-forming conditions were explored.

2- Process modeling

Given the high capability of the modified Mohr-Coulomb criterion in predicting failure behavior across a wide range of stress conditions, this research employed the mentioned criterion. Only half of the sheet and rollers were modeled due to the symmetry of the cross-sectional surface. The sheet was modeled in three dimensions as a deformable structure, and the forming rollers at each station were modeled as rigid-analytical to expedite the analysis process.

3- Results

Based on the obtained results, variations in the mentioned parameters within the investigated range in this study do not exert a substantial impact on the stress state and the position of the critical element. This finding confirms the validity of the results derived from the failure criterion in determining the damage value. Therefore, the impact of parameters, such as bending radius, sheet thickness, and bending angle on the damage level in the single-stage roller forming process were examined using the Mohr-Coulomb criterion. First, the effect of the bending angle on the damage value was examined (Fig. 1). Three bending angles of 15, 30, and 45 degrees were considered. According to the obtained results, in all cases, the damage value decreased with increasing the distance from the roller center. In addition, in the range of 10-15 mm from the roller center, the damage level rose significantly with a steep slope. The influence of the bending radius on the damage level is depicted in Fig. 2. According to the obtained results, increasing the bending radius leads to a reduction in damage, especially in regions close to the central axis of the roller. The reduction in bending radius

*Manuscript received: October 4, 2023. Revised, October 31, 2023, Accepted, December 9, 2023.

[1] Corresponding author. Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.
Email: h.talebi.q@kashanu.ac.ir

[2] Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares.

[3] Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

[4] Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

results in increased strain in the bending region, leading to a rise in damage. Increasing the bending radius from 1 to 2.5 and 4 mm enables the production of a section with a 45-degree angle without experiencing failure in the single-stage roller forming process. Moreover, the augmentation of sheet thickness induces higher strain in the outer layer, fostering an incremental progression of damage in the bending region with increasing thickness. According to the findings, at thicknesses of 2 and 2.5 mm, the damage level surpasses the critical limit, with an associated increase in the fracture length at a thickness of 2.5 mm (Figure 3).

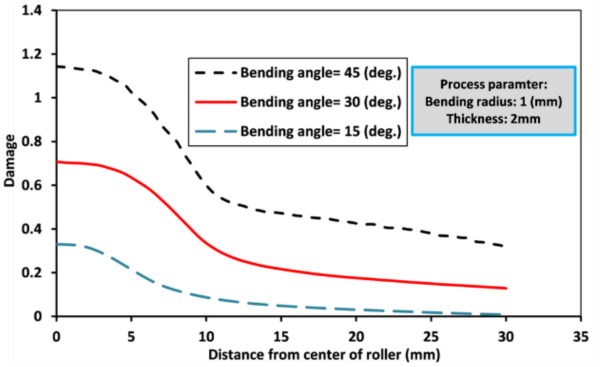


Fig. 1. Effect of bending angle on damage distribution based on Mohr-Coulomb criterion

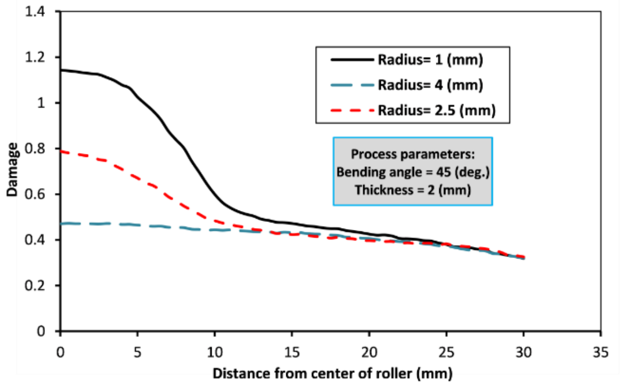


Fig. 2. Effect of bending radius on damage distribution based on Mohr-Coulomb criterion

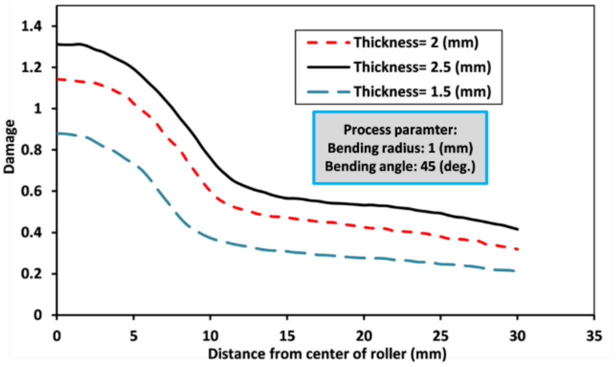


Fig. 3. Effect of sheet thickness on damage distribution based on Mohr-Coulomb criterion

5- Conclusion

The results indicate that a decrease in the bending angle leads to a reduction in damage throughout all regions (along the bend line). In addition, an increase in the bending radius results in reduced damage, particularly in regions close to the roller's central axis. Conversely, a decrease in the bending radius leads to an escalation in damage due to increased strain in the bending region. Moreover, the investigation reveals that augmenting sheet thickness causes a gradual increase in damage in the bending region with escalating thickness. Decreasing the sheet thickness to 1.5 mm allows for the production of a section with a 45-degree angle without encountering failure in the single-stage roller-forming process.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک،۳۵، ۱، ۱۴۰۳. (۱۱۵-۱۲۸)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

مطالعه شکل‌پذیری در فرایند شکل‌دهی غلتکی: نگرشی بر اثر پارامترهای فرایند بر توزیع آسیب *

مقاله پژوهشی

حسین طالبی قادیکلایی[(۱)] حسن مسلمی نائینی[(۲)] وحید زال[(۳)] فرزاد احمدی خطیر[(۴)]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.84727.1207

چکیده در این پژوهش، پدیده شکست نرم در فرایندهای شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، رفتار شکست آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 به کمک معیار شکست نرم پدیدارشناختی (موهر-کلمب اصلاح شده)، به کار گرفته شد. در ادامه، کالیبراسیون معیار شکست نرم به کمک روش ترکیبی تجربی-شبیه‌سازی انجام پذیرفت. مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی غلتکی به کمک تحلیل اجزای محدود انجام شد و معیار شکست توسط زیربرنامه مناسب به شبیه‌سازی اجزای محدود اعمال گردید. مطابق با نتایج، معیار مور-کلمب با درصد خطای ۴/۴۷ قابلیت پیش‌بینی شروع شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای را دارا می‌باشد. با توجه به اثرپذیری دقت نتایج توزیع آسیب از حالت تنش در طول فرایند، اثر پارامترهای فرایند شامل ضخامت، زاویه خم و شعاع گوشه بر پارامتر سه محوری تنش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر این موضوع می‌باشد که پارامترهای مذکور تأثیر قابل توجهی بر مقدار پارامتر سه محوری تنش نداشته و مقدار میانگین آن در تمامی حالات در محدوده ۰/۵۷ قرار دارد. لذا، نتایج پیش‌بینی شکست توسط این معیار، قابل تعمیم به سایر حالات در فرایند شکل‌دهی غلتکی می‌باشد. بر این اساس، اثر پارامترهای فرایند بر توزیع آسیب و شکست حین فرایند شکل‌دهی غلتکی بررسی شد. مطابق با نتایج، افزایش ضخامت ورق و زاویه خم موجب افزایش آسیب و همچنین، افزایش شعاع خم موجب کاهش سطح آسیب و یا تأخیر افتادن وقوع شکست در فرایند می‌گردد.

واژه‌های کلیدی شکل‌دهی غلتکی، شکست نرم، حالت تنش، مکانیک تغییر شکل.

Formability Study in Roll Forming Process: Insights into the Influence of Process Parameters on Damage Distribution

Hossein Talebi-Ghadikolaee Hassan Moslemi Naeini Vahid Zal Farzad Ahmadi Khatir

Abstract *In this study, the phenomenon of ductile fracture in single-stage roll forming processes was investigated. In this regard, the fracture behavior of the 6061-T6 aluminum alloy was examined using the Modified Mohr-Coulomb fracture criterion. Subsequently, the calibration of the fracture criterion was carried out using a combined experimental-simulation approach. The roll forming process was modeled using finite element analysis, and the fracture criterion was implemented within the appropriate subroutine of the finite element simulation. According to the results, the Modified Mohr-Coulomb criterion with a 4.47% error capability could predict the onset of fracture in the single-stage roll forming process. Considering the sensitivity of the damage distribution accuracy to the stress state during the process, the effects of process parameters including thickness, bending angle, and corner radius on the triaxial stress parameter were investigated. The results indicate that these parameters do not have a significant impact on the triaxial stress parameter, and its average value remains within the range of 0.057 throughout all cases. Therefore, the fracture prediction results obtained with this criterion can be extended to other roll forming scenarios. Based on this, the influence of process parameters on damage and fracture during the roll forming process was examined. According to the results, an increase in sheet thickness and bending angle leads to an increase in damage, while an increase in the corner radius results in a reduction in damage area and a delayed occurrence of fracture during the process.*

Key Words Roll forming, ductile fracture, stress state, deformation mechanics.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۷/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۹/۱۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول : استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

(۲) استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(۳) استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

(۴) نویسنده مسئول: استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

Email: h.talebi.q@kashanu.ac.ir

مقدمه

فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی از سازوکارهایی به منظور ایجاد تغییر شکل مومسان جهت تولید قطعاتی با هندسه‌ای مشخص، تشکیل شده است. تاکنون فرایندهای مختلفی همچون شکل‌دهی لاستیکی، استمپینگ، شکل‌دهی تدریجی، هیدروفرمینگ و خم‌کاری برای تولید قطعاتی همچون صفحات دو قطبی فلزی از جنس فولاد و تیتانوم [5-1]، فرم‌دهی لوله‌ها [6,7]، قطعات گنبدی [8]، مخروطی [9] و مکعبی [10] مورد استفاده قرار گرفته است. شکل‌دهی غلتکی نیز نمونه‌ای دیگر از فرایندهای شکل‌دهی ورقی فلزات برای تولید مقاطع کانالی شکل می‌باشد [11] که در این پژوهش مد نظر قرار گرفته است. به دلیل طبیعت خمشی تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی و ایجاد کشش در ناحیه بیرونی خم، شکست یک عامل محدود کننده می‌باشد. در نتیجه تولید قطعه سالم و بدون عیب، نیازمند تعیین محدوده‌ای ایمن برای پارامترهای فرایند به منظور تولید قطعه سالم می‌باشد [12,15] لذا، ضروری است تا روش‌های مناسب به منظور پیش‌بینی شکست در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، به خصوص فرایند شکل‌دهی غلتکی به کارگرفته شود.

در همین راستا، پژوهش‌هایی به منظور به‌کارگیری معیارهای شکست نرم در فرایندهای شکل‌دهی فلزات انجام شده است تا بتوان معیاری دقیق متناسب با شرایط فرایند و به منظور تعیین دقیق زمان وقوع شکست، ارائه نمود [18-16]. این موضوع، با توجه به کاربرد روزافزون فلزات استحکام بالا (نسبت استحکام به وزن بالا) به منظور دست‌یابی به سطح بالایی از کاهش وزن و افزایش مقاومت به ضربه در سازه‌ها، اهمیت به‌سزایی در سال‌های اخیر یافته است[19]. در واقع، معیارهای شکست نرم تلاش می‌کنند تا شکل‌گیری ترک و ناپایداری در طول فرایند را بر مبنای ایجاد حفره‌ها در مناطق دارای عیب، رشد و به هم پیوستگی آن‌ها (توزیع آسیب) مورد بررسی قرار دهند تا مدلی قابل اطمینان برای تعیین حد بحرانی شکت ارائه دهند [20] و همچنین، تاکنون راهکارهایی به منظور افزایش دقت معیار و تطابق بیشتر با فرایندهای مختلف شکل‌دهی فلزات مورد بررسی قرار گرفته است. لو و همکاران [21] به منظور بهبود معیارهای شکست نرم، پژوهشی را با هدف توسعه معیار شکست به منظور پیش‌بینی شکست در فولادهای استحکام بالا، انجام دادند. بر این اساس در ابتدا معیارهای شکست متفاوتی همچون کوکرافت- لاتهام، رایس و تریسی، بروزو، اویانه و... را مورد بررسی قرار دادند و به دلیل مشاهده اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از معیارهای شکست، معیاری بهبود یافته به منظور افزایش دقت نتایج ارائه نمودند.

میرنیا و شمساری [22] پدیده شکست را در فرایند شکل‌دهی تدریجی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از معیار پدیدار شناختی مور- کلمب اصلاح شده به منظور تعیین لحظه شکست در شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده نمودند و وضعیت تنش و کرنش را در نواحی بحرانی در طول فرایند مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج بیانگر اختلاف ۱۰ درصدی بین نتایج تجربی وقوع شکست در آزمون‌های شکل‌دهی تدریجی و مقادیر پیش-بینی شده توسط مدل‌سازی اجزای محدود می‌باشد. میرنیا و وحدانی [23] آزمون‌هایی به منظور کالیبراسیون معیار شکست نرم در محدوده وسیعی از حالات تنش ارائه نمودند. در این راستا از آزمون بالج هیدرولیکی به همراه نمونه‌های دایروی استفاده نمودند. آنان شکست نرم در آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی بالج بیانگر این موضوع می‌باشد که فشار، ارتفاع گنبد و ضخامت ورق در لحظه شکست توسط معیار کالیبره شده با آزمون‌های مذکور قابل دست‌یابی است.

همچنین، منحنی شکست ورق‌های دو لایه به کمک آزمون-های تجربی و تابع آسیب، توسط زاهدی و همکاران [24] مورد بررسی قرار گرفت. حد شکست در ورق دو لایه آلومینیوم- مس توسط آنان مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، تعیین حدود شکل‌دهی به کمک استفاده از روش ترکیبی شبیه-سازی- تجربی به خوبی قابل پیش‌بینی است. طبق نتایج آنان، در شرایطی که سنبه با لایه داخلی آلومینیومی در تماس باشد، کرنش شکست افزایش خواهد یافت.

ژان و همکاران [25] استفاده از معیار شکست نرم هو-چن را به منظور پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی تدریجی مورد استفاده قرار دادند. آنان معیار مذکور را با در نظر گرفتن رفتار ناهمسانگرد ورق اصلاح و کالیبره نمودند. مطابق با نتایج آنان، پیش‌بینی رفتار شکست در فرایند شکل‌دهی تدریجی، توسط معیار ارائه شده قابل دست‌یابی است. بن‌آتمن و همکاران[26] وقوع شکست در ورق فلزی SS304 را به کمک معیارهای شکست نرم بررسی نمودند. آزمون اریکسون به منظور ارزیابی

دقیق نتایج پیش‌بینی شکست به کار گرفته شد. مطابق با نتایج آنان، معیار رایس–تریسی با خطای ۴ درصد قابلیت پیش‌بینی جابه‌جایی در لحظه شکست را خواهد داشت.

همچنین، در کنار مطالعات انجام شده در زمینه توسعه معیارها و کاربرد آن‌ها در فرایندهای شکل‌دهی، پژوهش‌هایی در زمینه پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی انجام شده است. پدیده شکست در این فرایند، یکی از عیوب تأثیرگذار بر سلامت محصول نهایی در فرایند شکل‌دهی غلتکی است. این پدیده خصوصا در شکل‌دهی فولادهای استحکام بالا و آلومینیوم با کرنش شکست پایین، اهمیت به‌سزایی خواهد داشت [27]. اما پژوهش‌هایی که در راستای بررسی این پدیده در فرایند شکل‌دهی غلتکی انجام شده قابل توجه نبوده و تمام جنبه‌های موجود در این زمینه را پوشش نداده است. در ادامه این بخش به پژوهش‌هایی در راستای کاربرد معیارهای شکست نرم پدیدارشناختی در فرایند شکل‌دهی غلتکی اشاره خواهد شد و نتایج ارزشمند به‌دست آمده در این پژوهش‌ها به صورت مختصر بیان می‌شود.

ژائو و همکاران [28] وقوع شکست در فولاد دوفازی DP980 را در حین فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار دادند. آنان از شبیه‌سازی اجزای محدود به همراه معیار آسیب تنش برشی به منظور پیش‌بینی شکست در فرایند استفاده نمودند. مطابق با نتایج ارائه شده، وقوع شکست در ایستگاه ۵۰ درجه پیش‌بینی می‌گردد.

دادگر و همکاران [29] به بررسی پدیده پارگی در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر مقطع کانالی شکل با استفاده از معیارهای شکست نرم پرداختند. آنان به منظور بررسی دقت معیارها در پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر، شبیه‌سازی فرایند را در نرم‌افزار اجزای محدود انجام دادند. همچنین این پژوهشگران آزمایش‌های تجربی را بر روی آلیاژ Al6061-T6 برای ضخامت‌های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر، شعاع‌های خم ۰/۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر و زوایای خم ۲۵، ۴۵ و ۶۰ درجه انجام دادند. مطابق با نتایج ارائه شده در این پژوهش و مقایسه نتایج حاصل از پیش‌بینی محل وقوع پارگی توسط معیارهای شکست نرم و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، معیار شکست نرم آرگون گزینه بهتری نسبت به سایر معیارهای به کار برده شده در این پژوهش به منظور پیش‌بینی شکست می‌باشد.

وانگ و همکاران [30] پدیده شکست در شکل‌دهی غلتکی فولاد استحکام بالا را با استفاده از معیار اویانه مورد بررسی قرار دادند. آنان شکل‌دهی فولاد استحکام بالای دو فازی (DP 980) را با طراحی الگوی گل در ۱۳ ایستگاه انجام دادند و به منظور کالیبراسیون معیار از آزمون‌های استاندارد کشش محوری و کرنش صفحه‌ای استفاده نمودند. در ادامه نتایج به دست آمده از پیش‌بینی موقعیت شکست توسط معیار اویانه و نتایج تجربی را به منظور ارزیابی دقت معیار، مورد بررسی قرار دادند. طبق گزارش آنان، نتایج به دست آمده دارای دقت قابل قبول برای کاربردهای صنعتی می‌باشند. به منظور یافتن علل تفاوت‌های نتایج تجربی و شبیه‌سازی، این محققان وضعیت سطح مقطع شکست و نحوه بارگذاری در طول فرایند را مورد بررسی قرار دادند و این موارد را از عوامل مؤثر بر کاهش دقت پیش‌بینی شکست توسط معیار شکست معرفی کردند. بررسی‌های انجام گرفته توسط وانگ و همکاران [30] نشان می‌دهد که حالت تنش در طول فرایند ثابت نبوده (تغییر پارامتر سه محوری تنش از ۰/۵– تا ۰/۵) در صورتی که در آزمون‌های کالیبراسیون معیار، این مقدار ثابت می‌باشد. این موضوع یکی از عوامل کاهش دقت معیار در پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی می‌باشد. از سوی دیگر، وجود باند برشی در سطح مقطع شکست بیانگر تأثیر مستقیم اثر تنش برشی در فرایند شکست می‌باشد. اما این پارامتر در معادلات مربوط به معیار شکست نرم به کار گرفته شده نقشی نداشته و با توجه به گزارش‌های ارائه شده در این پژوهش می‌تواند یکی دیگر از دلایل تأثیرگذار در کاهش دقت معیارها باشد.

دئول و همکاران [31] از معیار لو–هو به منظور پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی فولاد مارتنزینی (Docol1400M) استفاده نمودند. مطابق با نتایج آنان، معیار کالیبره شده تحت آزمون‌های برش، نمونه سوراخ مرکزی و خم V شکل قابلیت پیش‌بینی شکست در آلیاژ مذکور را خواهد داشت. همچنین، اثر قابلیت معیارهای شکست تک ثابته به منظور پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی توسط طالبی و همکاران [32] مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، آنان اثر آزمون‌های کالیبراسیون بر دقت شکست را مورد بررسی قرار دادند.

تاکنون پژوهش‌های ارزشمندی در زمینه پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی انجام شده است، اما یکی از مباحث اصلی در بحث توزیع آسیب و شکست، مبحث قابلیت

تعمیم‌پذیری نتایج در شرایط مختلف شکل‌دهی می‌باشد. با توجه به تأثیرپذیری دقت مدل از مسیر بارگذاری در فرایند، ضروری است تا اثر پارامترهای فرایند شکل‌دهی غلتکی بر مسیر بارگذاری و مکانیک تغییر شکل بررسی شود. همچنین، پس از اثبات تعمیم‌پذیری نتایج (ارزیابی تغییرات مکانیک تغییر شکل و حالات بارگذاری)، اثر پارامترهای فرایند بر توزیع آسیب مورد بررسی قرار گیرد که در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا، در این پژوهش، از معیار موهر- کلمب برای پیش‌بینی شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی استفاده شد. در ابتدا، اثر پارامترهای فرایند شامل ضخامت، زاویه خم و شعاع خم بر مکانیک تغییر شکل (پارامتر سه محوری) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، پس از اطمینان از قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج، روند توزیع آسیب، و وقوع شکست در شرایط مختلف از فرایند شکل‌دهی غلتکی بررسی شد.

خواص مواد و آزمون‌های تجربی

در این پژوهش، از ورق آلومینیوم AA6061-T6 به منظور انجام فرایندهای تجربی و آنالیز رفتار شکست استفاده شد. رفتار ماده تا لحظه گلویی و بعد از آن توسط معادله (۱) تعیین شد. در معادله (۱)، که به نام معادله کار سختی مشهور است، رفتار ماده تا لحظه گلویی توسط معادله سوئیفت تعریف شده و در محدوده فراتر از گلویی ضریب اصلاح Q به معادله افزوده می‌گردد [33]:

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n & \bar{\varepsilon}^p \leq \bar{\varepsilon}^p_{necking} \\ Q[K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n] + (1-Q)[\bar{\sigma}_{UTS}] & \bar{\varepsilon}^p > \bar{\varepsilon}^p_{necking} \end{cases} \quad (۱)$$

که، K، ε_0، $\bar{\varepsilon}^p$، $\bar{\varepsilon}^p_{necking}$، n، $\bar{\sigma}_{UTS}$ به ترتیب برابر با ضریب استحکام، کرنش اولیه، کرنش مومسان، کرنش گلویی، نمای کرنش سختی و استحکام نهایی (تنش در لحظه گلویی) می‌باشند. همچنین، به منظور پیش‌بینی شکست ضروری است تا خواص شکست آلیاژ مذکور مطابق با معادلات ساختاری مناسب تعیین شود. در این پژوهش از قوانین افزایش آسیب (Damage evolution rule) استفاده می‌شود که تعیین کننده نحوه ارتباط نمو کرنش مومسان معادل و مقدار آسیب می‌باشند. ارتباط بین توسط معادله (۲) برقرار می‌گردد. لحظه شکست زمانی است که مقدار آسیب برابر با یک شود [۳۴]:

$$D(\bar{\varepsilon}_p) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{f(\eta, \bar{\theta})} \quad (۲)$$

تاکنون، معادلات رفتاری مختلفی به منظور ارتباط بین نشانگر آسیب و کرنش مومسان معادل در نظر گرفته شده است. با توجه به قابلیت بالای معیار مور- کلمب اصلاح شده در پیش‌بینی رفتار شکست نرم فلزات در محدوده وسیعی از حالات تنش، در این پژوهش معیار مذکور به منظور محاسبه آسیب در حین تغییر شکل مومسان استفاده شد (معادله ۳ [34]):

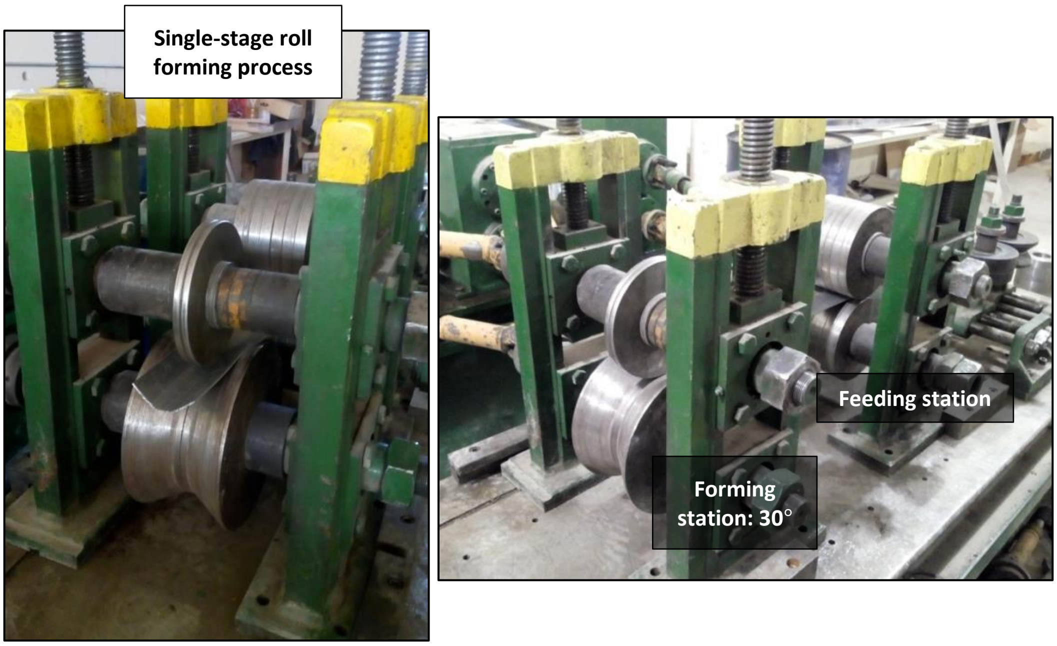
$$D(\bar{\varepsilon}_p) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_p} \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{\left\{ \frac{A}{c_2} \times \left[c_\theta^s + \frac{\sqrt{3}}{2-\sqrt{3}} (1 - c_\theta^s) \left(\sec\left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6}\right) - 1 \right] \times \left[\sqrt{\frac{1+c_1^2}{3}} \cos\left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6}\right) + c_1 \left(\eta + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{\bar{\theta}\pi}{6}\right) \right) \right] \right\}^{-\frac{1}{n}}} \quad (۲)$$

به منظور به کارگیری معیار فوق در آنالیز شکست، ضروری است تا ضرایب c_1،c_2، c_θ^s به کمک آزمون‌های تکمیلی تعیین شود. مطابق به روش توسعه داده شده توسط طالبی و همکاران [35,36] ضرایب فوق با به‌کارگیری آزمون‌های کشش تک محوری، کرنش صفحه‌ای، شکاف‌دار و برش، برای آلیاژ AA6061-T6تعیین شد. در این راستا، از نتایج تجربی و شبیه-سازی اجزای محدود (حالت تنش و کرنش معادل شکست) آزمون‌های مذکور استفاده شد. جدول (۱) بیانگر ضرایب رفتار کرنش سختی و رفتار شکست آلیاژ مذکور می‌باشد.

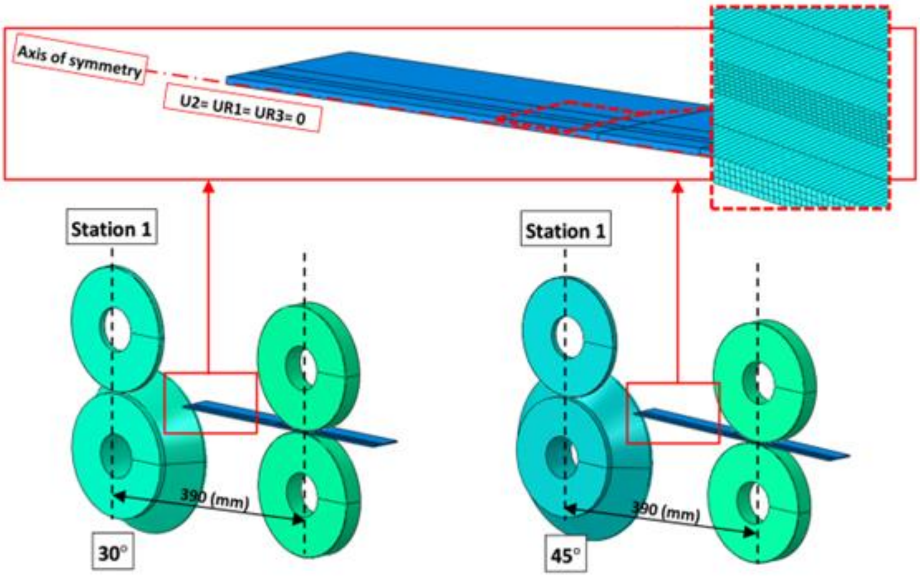
جدول ۱ خواص مکانیکی و شکست آلیاژ AA6061-T6 [۳۳]

پارامترها	واحد	مقادیر
ضریب استحکام (K)	MPa	۵۲۸/۳
توان کرنش سختی (n)	–	۰/۱۲۷
ε_0	–	۰/۰۳
Q	–	۰/۹۶
$\bar{\varepsilon}^p_{necking}$	–	۰/۰۹۵
c_1	–	۰/۱۰۷۳
c_2	–	۰/۹۶۹
c_θ^s	–	۲۸۲/۴

به منظور انجام آزمون‌های تجربی و بررسی رفتار ورق در بارگذاری شبه یکنواخت، فرایند شکل‌دهی غلتکی در ابتدا به صورت تک مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت، فرایند مذکور از سه بخش تشکیل شده است که در این میان می‌توان به ایستگاه هدایت، ایستگاه تغذیه ورق و ایستگاه شکل‌دهی اشاره نمود. در فرایند شکل‌دهی غلتکی تک مرحله‌ای، تمام تغییر شکل در یک ایستگاه به ورق اعمال می‌گردد. غلتک‌هایی با زاویه ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، به طور جداگانه در این مرحله مورد استفاده قرار گرفتند و مقاطعی با زوایای مختلف به منظور بررسی رفتار مومسان و شکست تولید شدند. طول، عرض و ضخامت ورق‌های مورد استفاده به ترتیب برابر با ۴۰۰، ۱۰۰ و ۲ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱ فرایند شکل‌دهی غلتکی تک مرحله‌ای با زاویه خم ۳۰ درجه



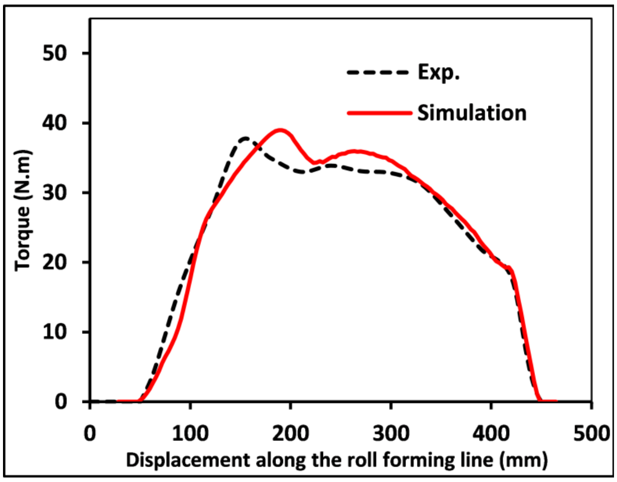
شکل ۲ مدل اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای

مدل‌سازی اجزای محدود

در این پژوهش، هندسه غلتک‌های فرایند شکل‌دهی غلتکی و ورق به صورت سه بعدی در نرم‌افزار مدل‌سازی گردید. با توجه به ماهیت شبه استاتیک فرایند، از حلگر صریح دینامیکی به منظور آنالیز آن استفاده شد. لازم به ذکر است که به دلیل متقارن بودن سطح مقطع، تنها نیمی از ورق و غلتک‌ها مدل‌سازی شدند. ورق به صورت سه بعدی و شکل‌پذیر و همچنین، غلتک‌های شکل-دهی در هر ایستگاه به صورت صلب- تحلیلی(Analytical rigid) در نرم‌افزار مدل‌سازی شدند (به منظور کاهش زمان تحلیل). همچنین، قسمت‌هایی همچون پایه‌های ایستگاه‌های شکل‌دهی و محورها در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده و نقش آن‌ها به کمک اعمال قیود و شرایط مرزی مناسب در نظر گرفته شد. کلیه تماس‌ها در فرایند شکل‌دهی غلتکی از نوع سطح به سطح(Surface-to-surface contact) تعریف شده است. بدین منظور، از مدل اصطکاکی کولمب (Coulomb) استفاده شد و همچنین، ضریب اصطکاک ۰/۱ برای تماس بین ورق و غلتک‌ها (بالایی و پایینی) در نظر گرفته شد[37]. لازم به ذکر است که هندسه ورق به کمک المان‌های C3D8R با ابعاد ۰/۵×۰/۵ شبکه-بندی گردید. همچنین، ۴ المان برای تقسیم‌بندی ورق در راستای ضخامت در نظر گرفته شد. ابعاد المان‌ها بر اساس روش همگرایی مش (تغییرات کرنش معادل) تعیین شد. تصویری از مدل اجزای محدود فرایند در شکل (۲) نشان داده شده است.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند شکل‌دهی غلتکی. پیش از پیش‌بینی آسیب و شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی، صحت نتایج عددی در توصیف رفتار مومسان ورق در فرایند شکل‌دهی غلتکی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی صحت مدل‌سازی اجزای محدود، منحنی گشتاور– جابه‌جایی حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی در طی شکل‌دهی مقطع ۳۰ درجه، مورد بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج به دست آمده (شکل ۳)، انطباق مناسبی میان منحنی‌های گشتاور– جابه‌جایی مشاهده می‌گردد که بیانگر دقت نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در توصیف رفتار مومسان ورق در فرایند مذکور، می‌باشد. همچنین، مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی موقعیت شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی بیانگر این موضوع می‌باشد مدل ارائه شده (معیار مور–کلمب) با درصد خطای ۴/۴۷ قابلیت پیش‌بینی شروع شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله-ای را داراست.



شکل ۳ منحنی گشتاور تجربی و شبیه‌سازی در فرایند شکل‌دهی غلتکی

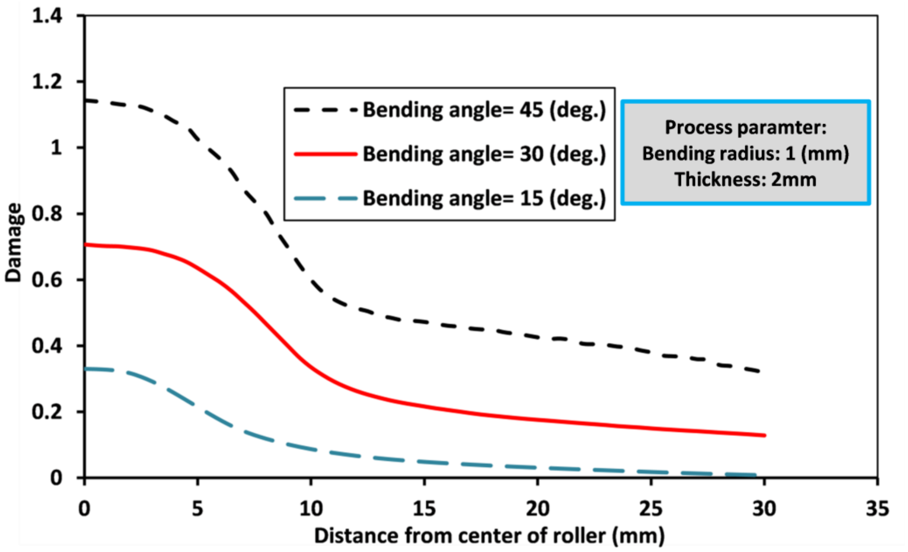
تأثیر پارامترهای فرایند بر حالت تنش در فرایند شکل‌دهی غلتکی. پیش از بررسی آسیب در فرایند شکل‌دهی غلتکی به کمک معیار موهر- کلمب، ضروری است تا قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج حاصل از معیار در سایر شرایط شکل‌دهی (تغییر شعاع، ضخامت و زاویه) بررسی گردد. نتایج، در شرایطی قابل تعمیم است که مسیر بارگذاری در حالات مختلف یکسان باشد. بدین منظور، تأثیر پارامترهای فرایند بر حالت تنش در فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور مقدار پارامتر سه محوری تنش در ازای کرنش پلاستیک معادل در المانی با بیشترین میزان تغییر شکل، در طول فرایند استخراج شد. با توجه به تغییرات مقادیر پارامتر سه محوری تنش در طول فرایند، مقدار میانگین پارامترهای مذکور به منظور اختصاص حالت تنش مشخص به حالت، محاسبه شد. مقدار میانگین پارامتر سه محوری تنش به کمک معادله (۴) محاسبه گردید [۱۷]:

$$\eta_{ave} = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_u^p}\int_0^{\bar{\varepsilon}_u^p} \eta(\bar{\varepsilon}^p)\, d\bar{\varepsilon}^p \qquad (۴)$$

نتایج مرتبط با آنالیزهای انجام شده در خصوص اثر پارامترهای فرایند بر مکانیک تغییر شکل در جدول (۴) نشان داده شده است. در نتایج ارائه شده، تأثیر شعاع خم، زاویه خم (زاویه دیواره غلتک) و ضخامت ورق بر مقادیر پارامتر سه محوری تنش نشان داده شده است. به منظور بررسی تأثیر شعاع خم بر حالت تنش، سایر پارامترها از جمله ضخامت ورق و زاویه خم به ترتیب برابر با ۲ میلی‌متر و ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. استراتژی مشابهی حین بررسی تأثیر ضخامت و زاویه خم در حالت تنش اتخاذ شد که مقادیر پارامترها و بازه تغییرات آن‌ها در جدول (۴) در نظر گرفته شده است. مطابق با نتایج به دست آمده، تغییرات پارامترهای مذکور در بازه مورد بررسی در این پژوهش، بر حالت تنش و موقعیت المان بحرانی تأثیر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت. این موضوع تأیید کننده اعتبار نتایج حاصل از معیار شکست در تعیین مقدار آسیب و تأثیر پارامترهای فرایند بر آن، در شرایط مختلف شکل‌دهی می‌باشد. بر این اساس، در ادامه، تأثیر پارامترهایی همچون شعاع خم، ضخامت ورق و زاویه خم بر میزان آسیب در فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای، توسط معیار مور-کلمب مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۴ اثر پارامترهای فرایند شامل زاویه خم، ضخامت ورق و شعاع خم بر مکانیک تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی

گروه اثرگذاری	پارامترهای فرایند			میانگین پارامتر سه محوری	کرنش نهایی
	ضخامت (mm)	زاویه خم (Deg.)	شعاع خم (mm)		
اثر ضخامت ورق	۲	۴۵	۱	۰/۵۵۲	۰/۳۶
	۱/۵	۴۵	۱	۰/۵۴۶	۰/۲۷
	۲/۵	۴۵	۱	۰/۵۵۵	۰/۴۴
اثر زاویه خم	۲	۱۵	۱	۰/۵۵۳	۰/۱
	۲	۳۰	۱	۰/۵۵۳	۰/۲۳
	۲	۴۵	۱	۰/۵۵۲	۰/۳۶
اثر شعاع خم	۲	۴۵	۱	۰/۵۵۲	۰/۳۶
	۲	۴۵	۲/۵	۰/۵۵۲	۰/۲۴
	۲	۴۵	۴	۰/۵۵۴	۰/۱۴

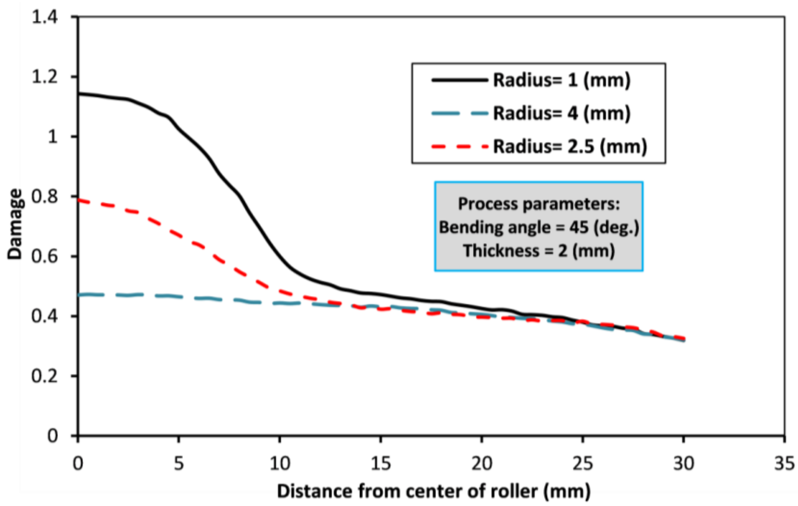


شکل ۵ تأثیر زاویه خم بر توزیع آسیب در ناحیه خم بر مبنای معیار مور- کلمب

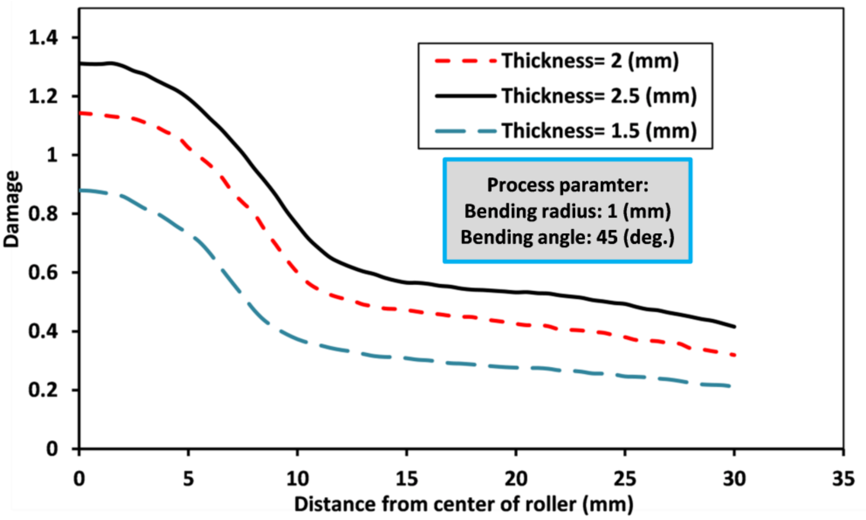
تأثیر پارامترهای فرایند بر روند رشد آسیب. در این بخش، تأثیر پارامترهای فرایند بر مقدار آسیب در حین تغییر شکل مومسان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است که تمام اطلاعات استخراج شده در این بخش از المان‌هایی مختلف واقع بر خط خم (فواصل مختلف نسبت محور مرکزی غلتک) استخراج شدند. بدین منظور، پس از عبور بخشی از غلتک از ایستگاه شکل‌دهی، مقادیر آسیب از المان بحرانی در مقطعی از جسم که کاملا زیر غلتک قرار دارد (هم موقعیت با محور مرکزی غلتک) و همچنین سایر المان‌ها در امتداد المان بحرانی و خط خم، تا فاصله ۳۰ میلی‌متر از محور مرکزی غلتک، استخراج گردید. در ابتدا تأثیر زاویه خم بر مقدار آسیب مورد بررسی قرار گرفت. سه زاویه خم ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه در ایستگاه شکل‌دهی در نظر گرفته شدند. سایر پارامترهای فرایند همچون، شعاع خم و ضخامت ثابت بوده و به ترتیب برابر با ۱ و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. نتایج توزیع آسیب در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده، در تمامی حالات با افزایش فاصله از مرکز غلتک میزان آسیب کاهش می‌یابد. همچنین در فاصله ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متری از مرکز غلتک، میزان آسیب با شیب زیادی افزایش می‌یابد. این موضوع ناشی از افزایش سطح تماس دیواره کانال با غلتک‌های پایینی می‌باشد که در نهایت موجب می‌گردد تا کسر قابل توجهی از تغییر شکل مومسان، در این محدوده بر ورق اعمال گردد. از نتایج ارائه شده در شکل (۵) می‌توان دریافت که کاهش زاویه خم موجب کاهش سطح آسیب در تمام نواحی (واقع بر خط خم) می‌گردد. همچنین، در زوایای ۳۰ و ۱۵ درجه، مقادیر آسیب کمتر از مقدار بحرانی بر مبنای معیار موهر- کلمب می‌باشد که بیانگر عدم وقوع شکست است.

تأثیر شعاع خم بر میزان آسیب در شکل (۶)۰ نشان داده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده، افزایش شعاع خم موجب کاهش آسیب مخصوصا در نواحی نزدیک به محور مرکزی غلتک می‌گردد. کاهش شعاع خم از طریق افزایش سطح کرنش در ناحیه خم موجب افزایش آسیب می‌گردد. از سوی دیگر، تأثیر شعاع خم در افزایش کرنش، زمانی اتفاق می‌افتد که ورق به کمک غلتک پایینی کاملا به سمت غلتک بالایی هدایت شود تا تغییر شکل متناسب با شعاع غلتک بالایی بر ورق اعمال گردد. این اتفاق در نواحی نزدیک به محور مرکزی غلتک اتفاق می‌افتد (موقعیتی که ورق کاملا زیر غلتک‌ها قرار دارد). در سایر نواحی، کرنش مومسان ایجاد شده در ورق ناشی از طول تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی می‌باشد که شعاع خم تأثیر قابل ملاحظه-ای بر مقدار تغییر شکل در آن نواحی نخواهد داشت. طول تغییر شکل در واقع محدوده‌ای از ورق می‌باشد که به دلیل خمش موضعی اعمال شده بر آن در ایستگاه شکل‌دهی، دچار تغییر شکل می‌گردد.

به دلایل فوق، با کاهش شعاع خم، میزان آسیب در نواحی نزدیک به مرکز غلتک افزایش یافته و تغییر محسوسی در نواحی دورتر از مرکز رخ نخواهد داد. همچنین، مطابق با نتایج به دست آمده، افزایش شعاع خم از ۱ به ۲/۵ و ۴ میلی‌متر موجب می‌گردد تا مقطعی با زاویه ۴۵ درجه بدون وقوع شکست توسط فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای تولید گردد.



شکل ۶ تأثیر شعاع خم بر میزان آسیب بر مبنای معیار مور–کلمب



شکل ۷ تأثیر ضخامت ورق بر میزان آسیب بر مبنای معیار مور- کلمب

در نهایت، تأثیر ضخامت بر آسیب در حین فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت، به منظور جلوگیری از تأثیر سایر پارامترهای فرایند بر توزیع آسیب، شعاع خم و زاویه خم به ترتیب برابر با ۱ میلی‌متر و ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. نتایج در شکل (۷) نشان داده شده است. افزایش ضخامت ورق موجب می‌گردد تا مقدار کرنش در لایه بیرونی خم افزایش یابد. این موضوع موجب می‌گردد تا آسیب در ناحیه خم در ازای افزایش ضخامت روند افزایشی داشته باشد. مطابق با نتایج به دست آمده، در ضخامت ۲ و ۲/۵ میلی‌متر مقدار آسیب از حد بحرانی تجاوز می‌نماید و طول شکست در ضخامت ۲/۵ میلی‌متر، افزایش می‌یابد (شروع شکست در فاصله بیشتری از مرکز غلتک، نسبت سایر حالات). کاهش ضخامت ورق به ۱/۵ میلی‌متر موجب می‌گردد تا مقطعی با زاویه ۴۵ درجه بدون وقوع شکست توسط فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای تولید گردد (آسیب کمتر از ۱).

نتیجه گیری

در این پژوهش، وقوع شکست در طی تغییر شکل مومسان آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 در فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای به صورت تجربی و تئوری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، معیار موهر- کلمب برای تعیین آسیب حین تعیین تغییر شکل مومسان در فرایند مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعد، مکانیک تغییر شکل در طول فرایند و اثر پارامترهای فرایند بر آن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، پس از اثبات قابلیت معیار به منظور تعیین آسیب در فرایند مذکور، اثر پارامترهای فرایند بر توزیع آسیب و شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج حاصل از پژوهش در ادامه بیان می‌گردد:

۱) مطابق با نتایج معیار موهر- کلمب، طول شکست توسط معیار مذکور در شکل‌دهی مقطع ۴۵ درجه ۴/۹۱ میلی‌متر پیش-بینی می‌گردد که انطباق مناسبی با مقدار تجربی طول شکست (۴/۷۰ میلی‌متر) خواهد داشت. به بیان دیگر معیار مذکور با درصد خطای ۴/۴۷ درصد قابلیت تعیین موقعیت شکست در فرایند شکل‌دهی غلتکی تک مرحله‌ای را داراست.

به منظور بررسی قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج پیش‌بینی مقدار آسیب به ازای پارامترهای مختلف در فرایند، مسیر بارگذاری در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با نتایج به دست آمده، تغییرات زاویه خم، ضخامت و شعاع گوشه، بر حالت تنش و موقعیت المان بحرانی تأثیر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت. این موضوع تأیید کننده اعتبار نتایج حاصل از معیار شکست در تعیین مقدار آسیب و تأثیر پارامترهای فرایند بر آن، در شرایط مختلف شکل‌دهی می‌باشد.

۲) اثر پارامترهای فرایند بر مقدار آسیب به کمک نتایج حاصل از معیار موهر- کلمب مورد بررسی قرار گرفت. بررسی توزیع آسیب در زوایای خم مختلف نشان می‌دهد که کاهش زاویه خم موجب کاهش سطح آسیب در تمام نواحی (واقع بر خط خم) می‌گردد. همچنین، در زوایای ۳۰ و ۱۵ درجه، مقادیر آسیب کمتر

از مقدار بحرانی بر مبنای معیار موهر- کلمب می‌باشند که بیانگر عدم وقوع شکست می‌باشد.

۳) افزایش شعاع خم موجب کاهش آسیب مخصوصا در نواحی نزدیک به محور مرکزی غلتک می‌گردد. کاهش شعاع خم از طریق افزایش سطح کرنش در ناحیه خم موجب افزایش آسیب می‌گردد. این اتفاق در نواحی نزدیک به محور مرکزی غلتک اتفاق می‌افتد (موقعیتی که ورق کاملا زیر غلتک‌ها قرار دارد). در سایر نواحی، کرنش مومسان ایجاد شده در ورق ناشی از طول تغییر شکل در فرایند شکل‌دهی غلتکی می‌باشد که شعاع خم تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار تغییر شکل در آن نواحی نخواهد داشت. همچنین، مطابق با نتایج به دست آمده، فزایش شعاع خم از ۱ به ۲/۵ و ۴ میلی‌متر موجب می‌گردد تا مقطعی با زاویه ۴۵ درجه بدون وقوع شکست توسط فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای تولید گردد.

۴) افزایش ضخامت ورق موجب می‌گردد تا آسیب در ناحیه خم در ازای افزایش ضخامت روند افزایشی داشته باشد. مطابق با نتایج به دست آمده، در ضخامت ۲ و ۲/۵ میلی‌متر مقدار آسیب از حد بحرانی تجاوز می‌نماید و طول شکست در ضخامت ۲/۵ افزایش می‌یابد (شروع شکست در فاصله بیشتری از مرکز غلتک، نسبت سایر حالات). کاهش ضخامت ورق به ۱/۵ میلی‌متر موجب می‌گردد تا مقطعی با زاویه ۴۵ درجه بدون وقوع شکست توسط فرایند شکل‌دهی غلتکی یک مرحله‌ای تولید گردد (آسیب کمتر از ۱).

واژه نامه

افزایش آسیب	Damage evolution rule
شبیه سازی اجزای محدود	Finite element simulation
کرنش سختی	Work hardening
معیار شکست	Ductile facture
حالت تنش	Stress state
مکانیک تغییر شکل	Deformation mechanics
شکل‌دهی غلتکی	Roll forming
صلب- تحلیلی	Analytical rigid
تماس سطح به سطح	Surface-to-surface contact

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] M. Elyasi, F. A. Khatir and M. Hosseinzadeh, "Manufacturing metallic bipolar plate fuel cells through rubber pad forming process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, pp. 3257-3269, (2017). https://doi.org/10.1007/s00170-016-9297-6

[2] M. Elyasi, H. T. Ghadikolaee and M. Hosseinzadeh, "Fabrication of metallic bipolar plates in PEM fuel cell using semi-stamp rubber forming process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 765-776, (2017). https://doi.org/10.1007/s00170-017-0206-4

[3] V. Modanloo, V. Alimirzaloo and M. Elyasi, "Manufacturing of titanium bipolar plates using warm stamping process", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, pp. 9661-9667, (2020). https://doi.org/10.1007/s13369-020-04870-3

[4] H. Talebi-Ghadikolaee, V. Modanloo, M. Elyasi and F. A. Khatir, "Multiple criteria decision support analysis for manufacturing process parameters selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, p. 14644207231203312, (2023). https://doi.org/10.1177/14644207231203312

[5] S. Seddighi, M. M. Barzegari and H. Talebi-Ghadikolaee, "Numerical-experimental investigation of using rubber blank holder on wrinkling of metallic bipolar plates formed by stamping process", *International Journal of*

Hydrogen Energy, (2023). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.172

[6] M. Elyasi, M. Paluch and M. Hosseinzadeh, "Predicting the bending limit of AA8112 tubes using necking criterion in manufacturing of bent tubes", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, pp. 3307-3318, (2017). https://doi.org/10.1007/s00170-016-9042-1

[7] M. Elyasi, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, S. Hosseinipour and S. Nourouzi, "New die design for improvement of die corner filling in hydroforming of cylindrical stepped tubes", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 223, no. 7, pp. 821-827, (2009). https://doi.org/10.1243/09544054JEM1344

[8] A. A. Nourmohammadi, M. Elyasi, and M. J. Mirnia, "Flexibility improvement in two-point incremental forming by implementing multi-point die," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 2933-2952, (2019). https://doi.org/10.1007/s00170-019-03307-y

[9] A. Hashemi, M. Hoseinpour and S. M. H. Seyedkashi, "Determination of Optimal Pressure Path in Sheet Hydroforming Process using Simulated Annealing Method", *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 28, no. 1, pp. 123-131, (2017). https://doi.org/10.22067/fum-mech.v28i1.41691.

[10] G. Azamirad, B. Arezoo, "Automatic determination of non-uniform blank-holder force in sheet metal forming", *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 1, pp. 81-96, (2022). https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.73195.1066.

[11] S. Hajiahmadi, H. M. Naeini, H. Talebi-Ghadikolaee, R. Safdarian and A. Zeinolabedin-Beygi, "Effect of anisotropy on spring-back of pre-punched profiles in cold roll forming process: an experimental and numerical investigation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-14, (2023). https://doi.org/10.1007/s00170-023-12516-5

[12] H. Talebi-Ghadikolaee, M. M. Barzegari and S. Seddighi, "Investigation of deformation mechanics and forming limit of thin-walled metallic bipolar plates", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 11, pp. 4469-4491, (2023). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.270

[13] H. Talebi-Ghadikolaee, H. Moslemi Naeini, A. H. Rabiee, A. Zeinolabedin Beygi, and S. Alexandrov, "Experimental-numerical analysis of ductile damage modeling of aluminum alloy using a hybrid approach: ductile fracture criteria and adaptive neural-fuzzy system (ANFIS)", *International Journal of Modelling and Simulation*, pp. 1-16, (2022). https://doi.org/10.1080/02286203.2022.2121675

[14] F. Ahmadi khatir, M. Elyasi, H. Talebi-Ghadikolaee, and V. Modanloo, "Experimental investigation and Numerical simulation of bending parameters on the spring back of the tube in the rotational bending process", *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, (2023).https:// doi.org/10.22067/jacsm.2023.84485.1204.

[15] M. Kadkhodayan, R. Akbary, "An Investigation into the Effect of Friction and Blank Holden Force on the Springblak of U-bending of an Isotropic Plates", *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 21, no. 1, pp. 115-127, 2010. https://doi.org/10.22067/fum-mech.v21i1.7715.

[16] H. Talebi-Ghadikolaee, H. M. Naeini, E. T. Ghadikolaee and M. J. Mirnia, "Predictive modeling of damage evolution and ductile fracture in bending process", *Materials Today Communications*, vol. 31, p. 103543, (2022).

https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103543

[17] M. Zohrabi, S. Mazdak and H. Talebi-Ghadikolaee, "Selection of Appropriate Ductile Fracture Criterion to Predict Failure of Folded Cross Section Profiles in Reshaping Process", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 8, no. 8, pp. 24-37, (2021).

[18] A. Zahedi Dizajyekan, "Investigation of Fracture Mechanism in Single Point Incremental Forming of AA5052 Aluminum Alloy Using the Bao-Wierzbicki Damage Model", *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35, no.34, pp. 63-76 (2023). https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81834.1180

[19] C. Ma, X. Yan and T. Gernay, "Ductile fracture of dual-phase steel at elevated temperatures", *Engineering Structures*, vol. 288, p. 116256, (2023). https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116256

[20] X. Yang, Y. Guo and Y. Li, "A new ductile failure criterion with stress triaxiality and Lode dependence", *Engineering Fracture Mechanics*, p. 109394, (2023).https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116256

[21] Y. Lou, H. Huh, S. Lim and K. Pack, "New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, no. 25, pp. 3605-3615, (2012). https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.02.016

[22] M. J. Mirnia, M. Shamsari, "Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 244, pp. 17-43, (2017). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.029

[23] M. J. Mirnia, M. Vahdani, "Calibration of ductile fracture criterion from shear to equibiaxial tension using hydraulic bulge test", (2020). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116589

[24] A. Zahedi, B. M. Dariani, and M. J. Mirnia, "Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 153, pp. 341-358, (2019).https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.02.002

[25] X. Zhan, Q. Hu, Z. Wang, S. Cai, and J. Chen, "The numerical method for predicting failure in single point incremental forming using a new anisotropic ductile fracture model," *Procedia Manufacturing*, vol. 29, pp. 45-52, (2019). https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.104

[26] K. B. Othmen, N. Haddar, A. Jegat, P.-Y. Manach and K. Elleuch, "Ductile fracture of AISI 304L stainless steel sheet in stretching", *International Journal of Mechanical Sciences*, p. 105404, (2020). https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105404

[27] M. S. Zeinali, H. M. Naeini, H. Talebi-Ghadikolaee and V. Panahizadeh, "Numerical and experimental investigation of fracture in roll forming process using Lou–Huh fracture criterion", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, no. 12, pp. 15591-15602, (2022). https://doi.org/10.1007/s13369-022-06662-3

[28] W. Zhao, Y. Yan, H. B. Wang and J. F. Gao, "Finite element analysis and fracture forecast of U channel flexible roll forming", *Advanced Materials Research*, vol. 683: Trans Tech Publ, pp. 604-607, (2013). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.683.604

[29] Y. Dadgar Asl, M. M. Sheikhi, A. Pourkamali Anaraki and M. Hosseinpour Gollo, "Experimental and Numerical Analysis of Fracture on Flexible Roll Forming Process of channel section in Aluminum 6061-T6 sheet", *Modares*

Mechanical Engineering, vol. 16, no. 5, pp. 329-338, (2016).

[30] H. Wang, Y. Yan, F. Jia, and F. Han, "Investigations of fracture on DP980 steel sheet in roll forming process", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 22, pp. 177-184, (2016). https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.008

[31] A. D. Deole, M. R. Barnett, and M. Weiss, "The numerical prediction of ductile fracture of martensitic steel in roll forming", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 144, pp. 20-31, (2018). https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.04.011

[32] H. Talebi-Ghadikolaee, H. M. Naeini, M. J. Mirnia, M. A. Mirzai, H. Gorji and S. Alexandrov, "Ductile fracture prediction of AA6061-T6 in roll forming process", *Mechanics of Materials*, vol. 148, p. 103498, (2020). https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103498

[33] H. Talebi-Ghadikolaee, H. M. Naeini, M. J. Mirnia, M. A. Mirzai, S. Alexandrov and M. S. Zeinali, "Modeling of ductile damage evolution in roll forming of U-channel sections", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 283, p. 116690, (2020). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116690

[34] H. Talebi-Ghadikolaee, H. M. Naeini, M. J. Mirnia, M. A. Mirzai, H. Gorji, and S. Alexandrov, "Fracture analysis on U-bending of AA6061 aluminum alloy sheet using phenomenological ductile fracture criteria," *Thin-Walled Structures*, vol. 148, p. 106566, (2020).https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106566

[35] H. Talebi-Ghadikolaee, H. Moslemi Naeini, M. Mirnia, M. Mirzai, H. Gorji and S. Alexandrov, "Study of the effect of calibration procedure on the accuracy of the phenomenological ductile fracture criteria in sheet metal forming", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 10, no. 1, pp. 1-16, (2020).

[36] H. Talebi-Ghadikolaee, H. Moslemi Naeini, M. J. Mirnia, M. A. Mirzai, S. Alexandrov and H. Gorji, "Experimental and numerical investigation of failure during bending of AA6061 aluminum alloy sheet using the modified Mohr-Coulomb fracture criterion", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 5217-5237, (2019). https://doi.org/10.1007/s00170-019-04549-6

[37] T. Zou, N. Zhou, Y. Peng, D. Tang and D. Li, "Numerical simulation of the roll forming process of aluminum folded micro-channel tube", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 734, no. 3: IOP Publishing, p. 032016, (2016). https://doi.org/10.1088/1742-6596/734/3/032016